



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**KUNNONVALVONNAN  
VÄRÄHTELYMITTAUKSET**

Olli Vuokila

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö 2017

# TIIVISTELMÄ

Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset

Olli Vuokila

Oulun yliopisto, Konetekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2017, 31 s.

Työn ohjaaja: Jouni Laurila

Tämän kandidaatin työn tavoitteena on kertoa lukijalle kunnonvalvonnan värähtelymittauksista. Työssä tutustutaan värähtelyn perusteisiin, värähtelymittauksissa käytettäviin menetelmiin sekä laitteisiin. Työssä käydään myös läpi yleisimmät vikatyypit ja kuinka ne voidaan tunnistaa. Työn lähteinä on käytetty pääasiassa alan kirjallisuutta ja standardeja. Tuloksista selviää, että värähtelymittauksilla voidaan havaita vikoja laitteista jo ennen kuin ne hajoavat.

Asiasanat:

Värähtelymittaus, kunnonvalvonta, konediagnostiikka

# **ABSTRACT**

Vibration measurements of condition monitoring

Olli Vuokila

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2017, 31 p.

Supervisor: Jouni Laurila

This thesis aims to tell its reader about vibration measurements of condition monitoring. Basics of vibrations, vibration measurement methods and used instruments are also being included. References used are mainly handbooks of condition monitoring and standards. Results reveal that faults in machines can be detected by vibration measurements before they fail.

Keywords:

Vibration measurement, condition monitoring, machine diagnostics

# ALKUSANAT

Tämä työ on tehty osana Oulun Yliopiston tekniikan kandidaatin tutkintoa. Tutkielman tekeminen on aloitettu keväällä 2017. Haluan kiittää yliopisto-opettaja Jouni Laurilaa työn ohjauksesta.

Oulussa, 22.11.2017

Olli Vuokila

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO.....	6
2 VÄRÄHTELYN PERUSTEET .....	7
3 VÄRÄHTELYMITTAUKSET .....	9
3.1 Mittaus .....	10
3.1.1 Mittauspiste .....	11
3.1.2 Anturi ja kaapelit .....	13
3.1.3 Mittalaite .....	13
3.2 Kokonaistason seuranta ja analysointi.....	14
3.3 Taajuusanalyysi .....	16
3.4 Muut menetelmät.....	17
3.4.1 Iskukoe .....	17
3.4.2 PeakVue ja verhokäyräanalyysi .....	19
3.5 Yleisimmät viat .....	19
3.5.1 Epätasapaino.....	20
3.5.2 Linjausvirhe.....	21
3.5.3 Resonanssi .....	22
3.5.4 Laakereiden viat .....	22
3.5.5 Vaihteistojen viat.....	24
3.5.6 Sähkömoottoreiden viat.....	27
4 YHTEENVETO .....	29
5 LÄHDELUETTELO .....	30

# 1 JOHDANTO

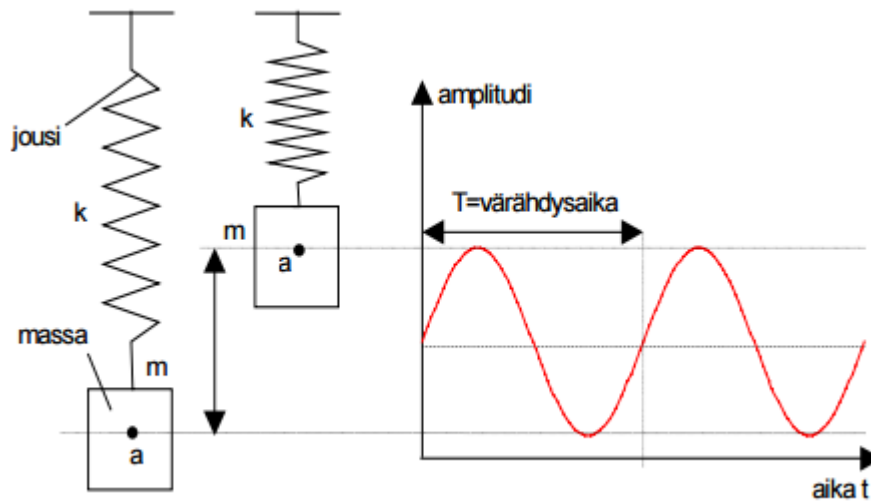
Tämän kandidaatin työn aiheina ovat teollisuuden värähtelymittaukset. Työn alussa kerrotaan värähtelyyn liittyvät perusteet lyhyesti. Sen jälkeen käsitellään värähtelymittausten tavoitteita ja sitä, miten mittaukset käytännössä toteutetaan. Kolmas kappale on kirjoitettu osittain kesätyöharjoittelusta saadun kokemuksen pohjalta.

Tämä aihe on valittu, koska opiskelen Konediagnostiikkaa pääaineenani ja värähtelymittaukset ovat iso osa sitä. Värähtelymittaukset ovat myös huonosti osattu alue insinöörien keskuudessa. Mobiililaitteiden kehittyminen, helppokäyttöisyys ja halpuus ovat mahdollistaneet värähtelymittauksien käytön muissakin kuin tuotannon kannalta tärkeissä laitteissa. Myös tavallisia moottoreita, pumppuja, puhaltimia ja kompressoreja mitataan säännöllisesti tehtaissa ja laitoksissa, joissa ollaan siirrytty kuntoon perustuvaan kunnossapitoon.

Tässä kandidaatin työssä käsiteltävät aiheet ovat perustavanlaatuisia kaikille kunnonvalvontainsinööreille. Lisäksi uskon, että suuri osa tämän työn sisällöstä on hyödyllistä tietoa kaikille insinööreille, jotka työskentelevät teollisuuden koneiden parissa. Kunnonvalvonta tulee tulevaisuudessa yleistymään, joten värähtelymittausten ymmärtäminen ei ole koskaan haitaksi.

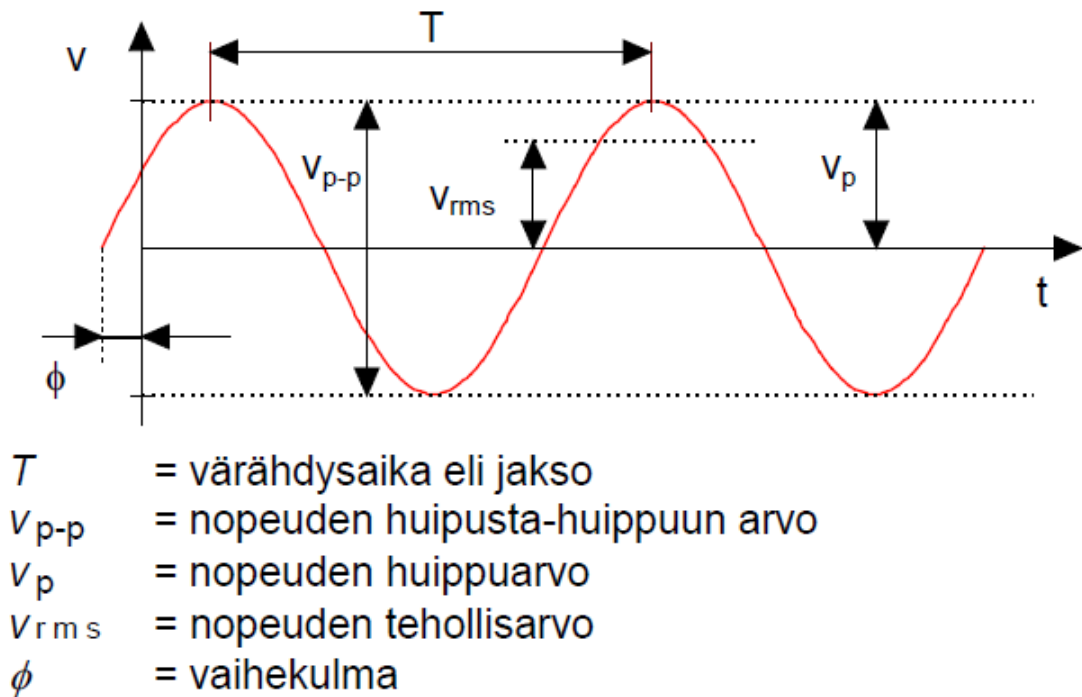
## 2 VÄRÄHTELYN PERUSTEET

Oletuksena voidaan pitää sitä, että kaikki laitteet värähtelevät. Yksikään laite ei voi olla täysin jäykkä eli kaikki laitteet värähtelevät saadessaan sopivan herätteen. Kaikkien laitteiden voidaan ajatella olevan jousi-massa-systeemejä. Jousi-massa-systeemi toimii siten, että massa liikkuu jousen varassa kahden huippunsa välillä. Huippujen välissä, nolla-tasossa, on systeemin tasapainoasema. Pyörivän koneen toiminta on jousi-massa-systeemin liikettä. Värähtely on siis massan liikettä sen tasapainoaseman suhteen. Kuvassa 1 on esitetty jousi-massa-systeemi ja sen värähtelyä kuvaava aikatasosignaali, josta on nähtävissä muun muassa värähdysaika. (ABB 2000)



**Kuva 1.** Jousi-massa-systeemi. (ABB 2000)

Värähtelyä voidaan kuvata aika-amplitudi-kuvaajana, jossa amplitudi kuvaa massan etäisyyttä tasapainoasemastaan. Värähtely on jatkuvaa liikettä. Yhtä värähdystä kutsutaan jaksoksi. Yhden jakson aikana massa lähtee liikkeelle ja palaa takaisin lähtötilanteeseen. Tämä aika on värähdysaika eli jakso. Värähtelystä seurataan useasti nopeuden tehollisarvoa, joka on esitetty kuvassa 2. Muita aika-amplitudi-kuvaajasta seurattavia tunnuslukuja ovat esimerkiksi huipusta-huippuun arvo ja vaihekulma. Nämä arvot on myös esitetty kuvassa 2. (ABB 2000)



**Kuva 2.** Aika-amplitudi kuvaajan tunnusluvut. (ABB 2000)

Kuvassa 2 on käytetty suurena nopeutta, mutta nopeus on ainoastaan yksi suure, joka kuvaa värähtelyliikettä. Nopeus voidaan muuttaa derivoimalla tai integroimalla ajan suhteen joksikin muuksi nopeuden derivaataksi, esimerkiksi kiihtyvyydeksi (Karioja 2017, s. 25: 28). Kiihtyvyydestä puhuttaessa voitaisiin käyttää esimerkiksi merkintää  $a_{p-p}$  kiihtyvyyden huipusta-huippuun arvolle. Kuvan 2 tunnusluvuista jakso  $T$  on esimerkiksi kahden huipun välinen etäisyys vaakasuunnassa eli aikana. Nopeuden huipusta-huippuun arvo  $V_{p-p}$  on aikatason positiivisen ja negatiivisen ääriarvon erotus. Nopeuden huippuarvo  $V_p$  on huipun etäisyys nollassa. Nopeuden tehollisarvo  $V_{rms}$  saadaan sinimuotoiselle signaalille kaavan 1 mukaisesti (Mikkonen et al. s. 209). Vaihekulma  $\phi$  on jakson kohta, johon sinimuotoinen aaltoliike on edennyt vertailukohdasta (PSK 5701).

$$V_{rms} \approx 0,707 \cdot V_p \quad (1)$$

missä  $V_{rms}$  on nopeuden tehollisarvo [mm/s],  
 $V_p$  on nopeuden huippuarvo [mm/s].



### 3 VÄRÄHTELYMITTAUKSET

Tässä kappaleessa käsitellään värähtelymittauksia. Tavoitteena on, että tämän kappaleen luettuaan lukija tietää, mitä värähtelymittaukset ovat ja miten niitä tehdään. Kappaleessa käsitellään myös mitä ovat yleisimmät viat ja kuinka ne voidaan havaita.

Täysin tasapainossa oleva pyörivä kone ei värähtele lainkaan, mutta täysin tasapainossa olevaa pyörivää konetta ei kuitenkaan ole käytännössä mahdollista valmistaa. Tämä voidaan perustella jo pelkästään sillä, että käytännössä ei ole mahdollista valmistaa täysin tasapainossa olevia koneen osia. Jokainen pyörivä kone siis värähtelee jonkin verran (Goldman 1999, s. 1). Kun epätasapainossa oleva koneen osa pyörähtää oman pyörähdysakselinsa ympäri, se aiheuttaa värähtelyä. Koneiden pyöriviä osia pystytään tasapainottamaan, mutta tällä ei koskaan päästä täysin virheettömään tulokseen. Kaikki pyörivät koneet siis värähtelevät, mutta kaikki värähtely ei kuitenkaan ole vaarallista, vaan värähtely on myös koneen ominaisuus (Goldman 1999, s. 21). Suuret värähtelytasot voivat kuitenkin lyhentää koneen käyttöikää huomattavasti (Mikkonen et al. 2009, s. 281). Mikäli värähtelytaso pääsee jostain syystä kasvamaan, se olisi hyvä huomata mahdollisimman nopeasti, jotta kone osattaisiin huoltaa mahdollisimman pian, ettei värähtely pääse aiheuttamaan vikoja. Huollon yhtenä tavoitteena on laskea koneen värähtelytaso mahdollisimman alas, jotta koneen käyttöikä pidentyy. Värähtely on siis seurausta koneen toiminnasta. Värähtelytason kohoamisen voi aiheuttaa esimerkiksi koneen kunnan muutos eli vikaantumisen. Syitä voi tosin olla muitakin. Vika aiheuttaa yleensä värähtelyä ja vastaavasti vian aiheuttama värähtely voi myös aiheuttaa lisää vikoja (Mikkonen et al. 2009, s. 311).

Värähtelymittausten kohteena ovat tavallisimmin pyörivät koneet tai niiden rakenteet. Värähtelyvalvontaa voidaan karkeasti sanottuna tehdä kahdella tavalla, joko seuraamalla värähtelyn voimakkuuden eli kokonaistason kasvua tai taajuusanalyysillä eli analysoimalla eri taajuuksilla esiintyvää värähtelyä. Kokonaistason seuraaminen on tapa, jossa koneisiin tehdään määrävälein mittauksia kannettavalla mittalaitteella. Jos kone on erityisen tärkeässä asemassa prosessia eikä saa päästä hajoamaan, voidaan mittausta tehdä jatkuvana kiinteällä anturilla eli online-mittausjärjestelmällä. Kokonaistason muutos on yleensä merkki koneen kunnan muutoksesta. Taajuusanalyysiä taas käytetään yleensä vasta, kun halutaan selvittää, mikä vika koneessa on. Sillä halutaan selvittää, mikä koneen osa on viallinen ja mistä vika on

tullut, jos vikaa edes on. Näin pyritään välttämään ehjien laitteiden huoltoja ja näin laitteiden huoltotaajuutta voidaan pienentää. Tätä kutsutaan kuntoon perustuvaksi kunnossapidoksi, joka on ollut lähivuosina ja tulee myös olemaan jatkossakin kasvava trendi teollisuudessa. (Mikkonen et al. 2009, s. 281: 287)

### 3.1 Mittaus

Värähtelymittaukset, pois lukien iskukokeet, tehdään aina käynnissä olevalle koneelle. Mittauksien halutaan olevan aina niin luotettavia kuin mahdollista. Mittaustulos on luotettavin, kun kone on mittauksen aikana sen suunnitelluissa käyttöolosuhteissa eli esimerkiksi silloin, kun kone on lämmennyt normaaliin käyntilämpötilaansa ja kuormitus vastaa todellista tilannetta. Mittauksessa täytyy myös huomioida, että mittaasetukset ovat oikein ja anturi on kiinnitetty huolellisesti. Muuten hyvissä olosuhteissa tapahtuva mittaus voi mennä pilalle huonon anturin kiinnityksen, väärän mittapisteen tai väärin mittalaitteen asetuksien takia. (PSK 5715)

Värähtelyitä mitattaessa anturi täytyy kiinnittää mitattavaan kohteeseen mahdollisimman hyvin. Paras tapa tähän on ruuvikiinnitys. Olisi myös hyvä, jos anturien kiinnitys olisi otettu huomioon jo laitetta suunniteltaessa. Tällöin voidaan olettaa, että kiinnitys on paras mahdollinen ja antureiden paikka on aina sama. (PSK 5703)

Usein käytettäessä ruuvikiinnitystä mittausjärjestelmä on yleensä myös online-mittausjärjestelmä. Online-mittausjärjestelmä pystyy keräämään mittauksia koko ajan. Aina kuitenkin online-mittausjärjestelmä ei ole tarpeen. Syitä tähän voivat olla esimerkiksi se, että se ei ole taloudellisesti kannattavaa, antureita ei ole pystytty asentamaan, laite ei ole niin kriittinen, että online-järjestelmää tarvittaisiin tai luokse päästävyys on niin hyvä, että online-mittausjärjestelmän hyödyt ovat pienet verrattuna kannettavan mittalaitteen käyttöön. (Mikkonen et al. 2009, s. 259: 263)

Kannettavalla mittalaitteella on mahdollista saada yhtä luotettavia mittaustuloksia kuin kiinteällä järjestelmällä. Tämä onnistuu kiinnittämällä anturi ruuvaamalla laitteeseen jo ennalta valmisteltuun mittauspisteeseen. Näin kiinnitys on hyvä ja mittaus saadaan tehtyä aina samasta paikasta riippumatta mittaajasta. Mittauksia voidaan myös tehdä

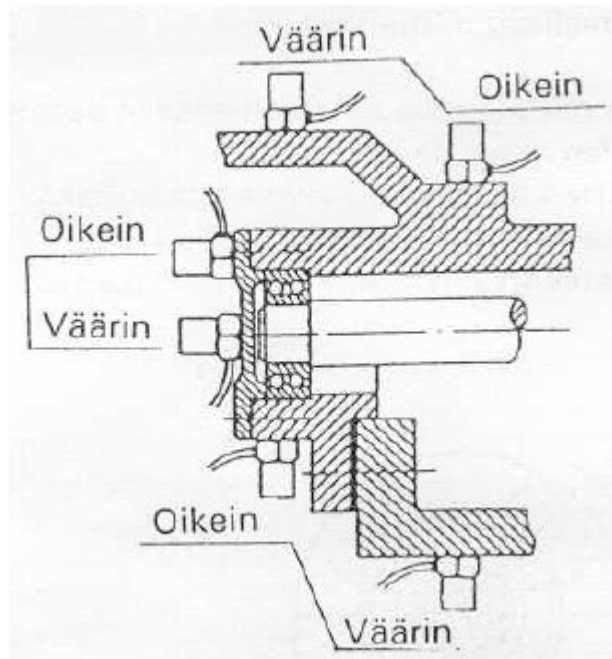
magneettikiinnityksellä tai painamalla anturia laitetta vasten tähän tarkoitettulla mittatikulla.

Anturin kiinnitys vaikuttaa mittauksen tulokseen (PSK 5703). Mitä kiinteämmin anturi on kiinnitetty, sitä korkeammalla ja laajemmalla taajuusalueella on mahdollista mitata luotettavasti. Magneettikiinnityksessä luotettavan mittauksen ylärajana pidetään noin 3000 Hz, mutta todella vahvoilla magneeteilla voidaan päästä jopa 10 kHz asti (Goldman 1999, s. 62). Magneetin ja koneen välinen maalipinta huonontaa mittauksen luotettavuutta. Anturin painaminen mittauspisteeseen on vielä magneettiakin epävarmempi menetelmä. Kiinnityksen ylärajataajuus riippuu siitä, kuinka hyvin anturia painetaan konetta vasten. Mittauksen onnistuessa tuloksen voidaan olettaa olevan riittävän hyvä, lähes magneettia vastaava. Joskus olosuhteet pakottavat käyttämään magneettia tai painettavaa anturia. Vaikka mittaustulos ei ole kiinteän mittauksen veroinen, on se kuitenkin halpa ja helppo menetelmä. Joissakin tilanteissa epävarma mittaustulos on useasti parempi kuin ei mittausta ollenkaan. Tulkitsijan tosin täytyy olla tietoinen mittauksen epävarmuustekijöistä, kuten anturin huonosta kiinnityksestä. Värähtelymittauksilla pystytään myös tarkkailemaan koneen kuntoa, kun se käynnistetään. Jos koneen käynnistyessä värähtelytasot ovat korkeita, voidaan käynnistys keskeyttää ja estää mahdollinen hajoaminen. (Mikkonen et al. 2009, s. 259: 260)

### **3.1.1 Mittauspiste**

Mittauspisteen määrittäminen on tärkeimpiä asioita mittauksen suunnittelussa. Väärä mittauspiste tekee mittaustuloksesta epäluotettavan. Ongelmallista on, että väärän mittauspisteen arvo voi olla joko liian suuri, liian pieni tai oikea. Mittauspistettä ei voi siis selvittää kokeilemalla, vaan se pitää valita asianmukaisin perustein. Lähtökohtaisesti värähtelymittauksilla halutaan mitata koneen laakereiden ja akselin kuntoa. Mittauspisteestä täytyy siis pystyä mittaamaan laakerin ja akselin värähtelyt mahdollisimman luotettavasti. Mittauspisteen valinta täytyy tehdä siten, että anturi ja värähtelynlähde ovat mahdollisimman lähellä toisiaan ja niiden välissä tulisi olla mahdollisimman vähän rajapintoja. Rajapinnat heikentävät korkeataajuisten värähtelyjen etenemistä rakenteessa. Parhaaseen mahdolliseen mittauspisteeseen ei tarvitse aina pyrkiä, vaan monesti riittävän luotettavat mittaukset voidaan toteuttaa mittauskohdista, joihin on kohtuullisen helppo luoksepäästävyys. Online-kunnonvalvontajärjestelmän

mittapisteeisiin kannattaa kuitenkin käyttää enemmän resursseja. Kuvassa 3 on esimerkkejä anturin kiinnityspaikoista. (PSK 5702)



**Kuva 3.** Esimerkki mittauspisteiden valinnasta. (PSK 5702)

Jotta saadaan kerättyä riittävän kattavasti tietoa, laitteen jokaista laakeria tulisi mitata radiaalisuunnassa kahdesta eri suunnasta: pysty- ja vaakasuunnassa. Yksi syy tähän on, että rakenteesta johtuva värähtely voi joissain tilanteissa näkyä pelkästään yhdessä suunnassa. Tämä taas johtuu siitä, että rakenne voi olla esimerkiksi tukeva vaakasuunnassa, mutta paljon hennompi pystysuuntaan. Tästä syystä rakenteessa herää pääasiassa pystysuuntaista värähtelyä. Lisäksi akselia kohden täytyy mitata yhdestä pisteestä aksiaali-suunnasta. Esimerkiksi tavallisissa sähkömoottoreissa on kaksi laakeriyksikköä, joten mittapisteitä olisi hyvä olla yhteensä viisi: molemmissa laakereissa pysty- ja vaakasuunnassa, sekä yksi piste aksiaalisuunnassa. (Goldman 1999, s. 78: 79)

Mikäli mahdollisia kiinnityspaikkoja anturille ei ole saatetaan joutua rakentamaan uloke, johon anturi kiinnitetään. Tämä uloke saattaa herätä värähtelemään sen ominaistajuuksilla ja vääristää mittaustuloksia. Tällaisessa tilanteessa mittaustuloksissa saattaa näkyä korkeita värähtelytasoja, vaikka värähtelytasot olisivat matalia.

### 3.1.2 Anturi ja kaapelit

Lähes aina värähtelymittauksissa käytetyt anturit ovat kiihtyvyyssantureita (PSK 5703). Kiihtyvyyssanturit ovat halpoja ja varmatoimisia. Olemassa on myös nopeus- ja siirtymäantureita, mutta niitä käytetään vähemmän. Nopeusanturi sisältää liikkuvia osia ja on kooltaan iso (Mikkonen et al. 2009, s. 234: 243). Siirtymäanturia taas käytetään suhteellisessa mittauksessa, jolla voidaan mitata koneen osien venymää ja asemaa (PSK 5702). Kiihtyvyyssanturi ei sisällä liikkuvia osia ja näin ei vikaannu kovin helposti (Mikkonen et al. 2009, s. 238). Mittauksissa käytettävät kaapelit taas vikaantuvat helpommin. Valittaessa kaapeleita ja liittimiä niiden täytyy täyttää samat olosuhdevaatimukset kuin itse anturinkin (PSK 5703). Mittausten analysoijan ja mittajaan on ehdottoman tärkeää osata tunnistaa, jos anturi tai kaapeli on viallinen. Yleensä se on helppoa, koska anturin tai kaapelin rikkoontuessa saadut mittausarvot ovat joko todella pieniä, todella suuria tai niitä ei saada ollenkaan.

Tärkeintä anturin valinnassa on anturin herkkyys. Tavallisin kiihtyvyyssanturin herkkyys on 100 mV/g, mutta hitaasti pyöriville koneille voidaan käyttää herkempää anturia, esimerkiksi 500 mV/g ja nopeasti pyöriville koneille taas vähemmän herkkää anturia esimerkiksi 10 mV/g. (PSK 5703)

### 3.1.3 Mittalaite

Värähtelymittauksiin voidaan käyttää kannettavaa mittalaitetta tai kiinteää mittausjärjestelmää (PSK 5710). Yksinkertaisimmillaan mittalaite voi olla kokonaistasomittari. Tämä mittalaite antaa periaatteessa ainoastaan yhden värähtelyn voimakkuudesta kertovan tunnusluvun, kokonaistason, jota voidaan seurata. Yhden tunnusluvun käyttö optimaalisesti hyödynnettynä voi kuitenkin riittää kunnonvalvonnassa todella pitkälle. Tätä voidaan käyttää esimerkiksi tarkempaan kunnonvalvontaan valittavien koneiden värähtelytasojen kartoitukseen. Tarkemmat mittaukset paikan päällä voidaan tehdä taajuusanalysointilaiteella, joka on jo kalliimpi ja monimutkaisempi laite. Taajuusanalysointilaiteella voidaan selvittää, millä taajuudella ongelmallinen värähtely on. Tästä taas voidaan päätellä värähtelyn aiheuttajaa ja mittauksen luotettavuutta. Kokonaistasoarvoja ja mittauksia taajuusanalyysiä varten voidaan myös mitata kiinteän mittausjärjestelmän avulla. Tällaisessa mittausjärjestelmässä on kiinteitä antureita, jotka on kaapeloitu niin, että niiden antamia

arvoja voidaan seurata reaaliajassa. Kuvassa 4 on Emersonin monipuolinen kannettava mittalaite. (Mikkonen et al. 2009, s. 259: 264)



**Kuva 4.** Kannettava mittalaite Emerson CSI 2140. (Emerson)

### 3.2 Kokonaistason seuranta ja analysointi

Nopeuden tehollisarvon ( $V_{rms}$ ) eli kokonaistason mittaus taajuusalueelta 10 - 1000 Hz on menetelmä, jolla mitataan värähtelyn voimakkuutta. Mittaus voidaan suorittaa esimerkiksi tietylle koneelle kuukauden välein ja havaita mittauksista, milloin kokonaistaso on noussut. Tällä menetelmällä pyritään korvaamaan määräaikaishuoltoja ja huoltamaan vain ne koneet, joissa on merkkejä vikaantumisesta. Tämä ei kuitenkaan ole täysin mahdollista, koska koneissa on myös ei-liikkuvia osia, joiden kunnan muutos ei välttämättä näy värähtelymittauksissa, esimerkiksi kumisten osien haurastuminen. Koneille täytyy siis kuitenkin tehdä myös huoltoja tietyllä taajuudella, mutta jokainen tekemättä jätetty huolto tuo säästöjä, kuten myös estetty vikaantuminen. Kunnanvalvonnassa on kuitenkin tärkeää tiedostaa, että yksikin väärä arvio voi johtaa tärkeän koneen ei-toivottuun hajoamiseen ja syödä huomattavan määrän

kunnonvalvonnan avulla saavutettuja kustannussäästöjä. Mikäli mittaukset eivät ole luotettavia, niiden perusteella ei pystytä tekemään luotettavia johtopäätöksiä koneen kunnosta. (Mikkonen et al. 2009, s. 284)

Värähtelyn kasvulle on aina olemassa syy, joka voi olla esimerkiksi laakerivika, resonanssi, huojunta, linjausvirhe tai hammasvaihdevika. Toki on myös useita muita syitä, jotka voivat aiheuttaa värähtelyn kasvua. Kokonaistason mittauksella ei kuitenkaan pystytä vielä varsinaisesti selvittämään, mikä vika on kyseessä. Sen avulla saatetaan kuitenkin parhaassa tapauksessa pystyä sulkemaan joitain vikatyyppejä pois. Mittaamalla kokonaistasoa eri paikoista ja suunnista voidaan tehdä joitakin johtopäätöksiä. Kokonaistason seuranta ei yksinään ole paras mahdollinen kunnonvalvontamenetelmä, koska esimerkiksi laakeriviat näkyvät verhoikärspektrissä ja PeakVue-signaalissa aikaisemmin kuin kokonaistason kasvuna (ABB 2000). Kokonaistason mittaaminen ja tulkinta on kuitenkin helppoa, koska siinä mitataan ainoastaan yhtä tunnuslukua, eikä taajuuskohtaista analysointia ole edes mahdollista tehdä.

Koneille laaditaan konekohtaisesti tai joissain tapauksissa mittapistekohtaisesti värinärajat joiden ylitystä seurataan. ISO 10816 standardin mukaan värähtelyluokkia on neljä. Ne on merkitty tunnuksilla A, B, C ja D. ISO 10816 tapauksessa on käytetty suureina 10-1000 Hz taajuusalueen värähtelyn tehollisarvoja. Alin taso A on käyttöönottoraja eli siis raja, jota matalampi koneen värähtelytason täytyy olla käyttöönotossa. Toiseksi alin taso on B, jonka alla koneen tulisi olla normaalikäytössä. Toiseksi korkein taso on C, jossa koneen kunto on jo alkanut muuttua. Tällöin konetta tulisi seurata tarkemmin ja sille olisi hyvä aikatauluttaa kunnossapito. Korkein taso D on vaurioraja, jolloin kone on jo niin huonossa kunnossa, että se täytyy pysäyttää. Rajojen määrittämisessä on tärkeintä toimivuus. Muutokset halutaan huomata mahdollisimman aikaisessa vaiheessa, jotta tarkempi seuranta voidaan aloittaa mahdollisimman aikaisin. Kuvassa 5 on värähtelyraja-arvotaulukko koneille, joiden teho on 300kW-50MW. Kuvan 5 taulukossa on käytetty edellä mainittuja värähtelyluokkia. (ISO 10816-3)

**Table A.1 — Classification of vibration severity zones for machines of Group 1: Large machines with rated power above 300 kW and not more than 50 MW; electrical machines with shaft height  $H \geq 315$  mm**

Support class	Zone boundary	r.m.s. displacement	r.m.s. velocity
		$\mu\text{m}$	mm/s
Rigid	A/B	29	2,3
	B/C	57	4,5
	C/D	90	7,1
Flexible	A/B	45	3,5
	B/C	90	7,1
	C/D	140	11,0

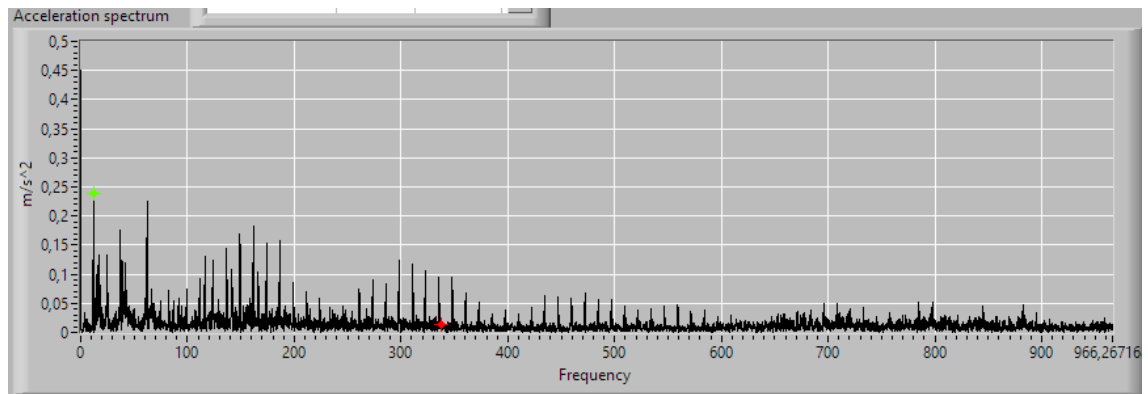
**Kuva 5.** Taulukko, jossa on ilmoitettu värähtelyluokkien raja-arvot. (ISO 10816-3)

Nykyaikainen kunnonvalvontajärjestelmä perustuu siihen, että mittaustulokset siirretään tietokantaan, josta tuloksia pystytään tarkastelemaan. Jos jokin mittaustuloksille asetettu raja-arvo ylittyy, järjestelmä antaa hälytyksen. Tulokset voidaan saada esimerkiksi reittimittauksista tai online-mittauksista. Reittimittaus tarkoittaa kannettavalla mittalaitteella tehtyjä mittauksia, joita mittaaja käy tekemässä koneille tietyin väliajoin. Sana reittimittaus tulee siitä, että mittaaja kulkee mitatessaan reitin, jossa mittaa useita koneita. Mittaaja voi siis olla eri henkilö kuin mittausten tulkitseja.

### 3.3 Taajuusanalyysi

Värähtelysignaalin taajuusanalyysiä käytetään silloin, kun koneessa on havaittu poikkeama ja halutaan selvittää, mistä poikkeama johtuu. Taajuusanalyysissä analysoidaan värähtelyn taajuussisältöä. Aikatasosignaalista voidaan laskea taajuusspektri, joka kertoo millä taajuuksilla värähtelyä esiintyy. Jos esimerkiksi värähtelyn kokonaistaso on 7 mm/s, taajuusanalyysin avulla voidaan saada selville, että se johtuu pääosin voimakkaasta värähtelystä taajuuksilla 48,7 Hz ja 99,99 Hz. Taajuusanalyysillä pystytään näkemään, kuinka suuret amplitudit kyseisillä taajuuksilla on. Kuvassa 6 on esimerkki kiihtyvyyssignaalista lasketusta taajuusspektristä. (Mikkonen et al. 2009, s. 285: 286)





**Kuva 6.** Taajuusspektri.

Värähtelyspektrissä olevat piikit eivät ole sattumalta tietyillä taajuuksilla, vaan jokaiselle piikille on olemassa selitys. Esimerkiksi koneen pyörimistaajuudella voidaan olettaa olevan aina piikki, joka johtuu epätasapainosta. Jos koneen vikaantumisen myötä kasvaneet tai ilmestyneet piikit saadaan tunnistettua ja niiden syy selvitettyä, ollaan lähempänä vian aiheuttajan löytämistä. Jos taajuusspektriin on ilmestynyt uusi piikki, jota ei ollut aikaisemmissa mittauksissa, voi kyseinen piikki olla oire tulevasta viasta. Piikin ollessa ominainen jollekin koneenosalle, voidaan epäillä kunnonmuutosta tässä osassa. (Mikkonen et al. 2009, s. 291: 294)

### 3.4 Muut menetelmät

Värähtelysignaalien taajuusanalyysi ja kokonaistasomittaukset ovat tavallisimpia kunnonvalvonnan menetelmiä ja yleensä ne ovat hyvin toimivia, mutta niistä ei voi kuitenkaan saada kaikkea tarvittavaa tietoa. Joskus joidenkin vikojen huomaamiseen tai pois sulkemiseen tarvitaan muita menetelmiä, kuten esimerkiksi iskukokeita tai erilaisia signaalinkäsittelymenetelmiä.

#### 3.4.1 Iskukoe

Iskukoe on menetelmä, jolla voidaan selvittää jonkin rakenteen eli myös koneen tai laitteen, ominaistaajuudet. Ominaistaajuus tarkoittaa taajuutta, jolla jokin rakenne herää värähtelemään saadessaan herätteen. Herätteen taajuuden täytyy olla lähellä rakenteen ominaistaajuutta, jotta herääminen tapahtuu. Jokaisella rakenteella/koneella on vähintään yksi hallitseva ominaistaajuus. Ominaistaajuuksia voi olla myös useampia. Ideana ominaistaajuuksien mittaamisessa on, että koneelle/rakenteelle annetaan heräte iskuvasaralla ja herätteen vaikutusta mitataan kiihtyvyyssanturilla. Herätteellä tarkoitetaan rakenteeseen kohdistuvaa voimaa tai liikettä (PSK 5701). Iskuvasara on

pehmeäpäinen vasara, jonka iskuvoima voidaan mitata mittalaitteella. Useissa iskuvasaroissa on vaihdettava lyöntipää. Lyöntipäitä on eri kovuisia ja niiden valinnalla voidaan vaikuttaa heräävään taajuusalueeseen. Pehmeämpi pää herättää matalampia taajuuksia. Voimakas iskumainen heräte herättää laajan taajuusalueen. Tästä iskusta selvästi muita taajuuksia voimakkaammin heränneet taajuudet ovat rakenteen ominaistaajuuksia. Yleensä iskukoe tehdään pysähdyksissä olevalle koneelle, mutta sen tekeminen käynnissä olevalle koneelle on myös mahdollista. (Goldman 1999, s. 98: 127)

Ominaistaajuuden voi myös selvittää laskemalla. Jotta laskemalla saataisiin mahdollisimman tarkka tulos ominaistaajuudesta, täytyy laskettava rakenne pystyä mallintamaan mahdollisimman hyvin. Tämä on laskennan suurin ongelma. Mikäli rakenne ei ole yksinkertainen, kuten pelkkä palkki, täytyy kaikki rakenteen osat mallintaa, jotta tulos olisi hyvä. Ominaistaajuuden voi kuitenkin laskea yksinkertaistettuna varsin helposti. Iskukokeessa rakenteen monimutkaisuus ei haittaa. Iskukokeen ongelma on saada rakenne heräämään eli siis saada tuotettua rakenteelle niin voimakas isku, että rakenne herää värähtelemään. Esimerkiksi sähkömoottorit ja pumput pystytään herättämään suhteellisen helposti, mutta tuulimyllyn tai kerrostalon ominaistaajuuden selvittämiseen joudutaan käyttämään laskennallisia menetelmiä. (Goldman 1999, s. 98: 127)

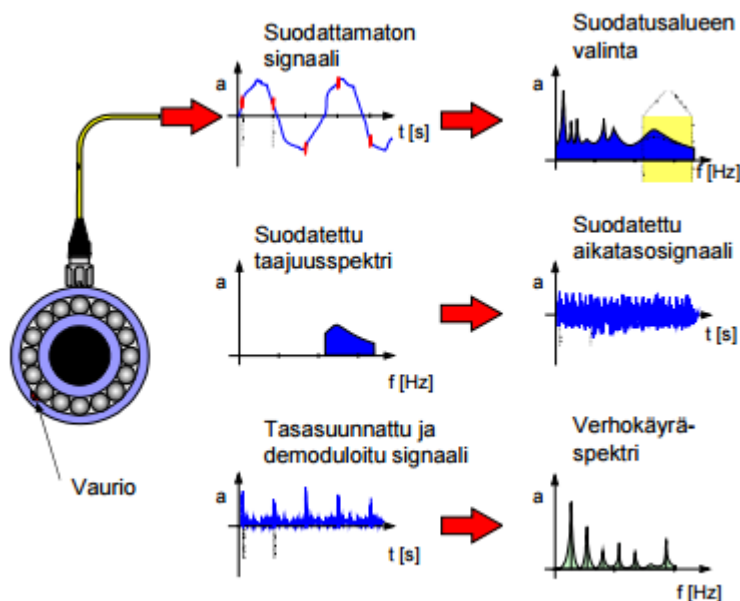
Ominaistaajuus voidaan määrittää tavalliselle jäykälle kappaleelle laskemalla kaavalla (2) (Laukkanen 2017 & Goldman 1999, s. 122). Täytyy kuitenkin muistaa, että tällä kaavalla pystytään laskemaan vain yksinkertaisen rakenteen ominaistaajuuksia. Rakenteiden ominaistaajuudet on myös mahdollista laskea tietokoneavusteisesti mallintamalla rakenne.

$$f_i = \frac{\lambda_i^2}{2\pi L^2} \left(\frac{EI}{m}\right)^{0.5} \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

missä  $\lambda$  on taulukko arvo, joka kuvaa kappaleen ominaisuutta,  
 $m$  on massa, [kg]  
 $E$  on kimmomoduuli [GPa],  
 $I$  on jäyhyysmomentti [ $m^4$ ],  
 $L$  on palkin pituus [m],  
 $i$  on ominaistaajuuden monikerta.

### 3.4.2 PeakVue ja verhokäyräanalyysi

PeakVue eli Peak Value ja verhokäyräanalyysi ovat värähtelymittausten menetelmiä, joilla pyritään signaalinkäsittelyn avulla tulkitsemaan korkeataajuisia ja heikkoa värähtelyä, joka usein peittyy matalataajuisen korkeampiampitudisen värähtelyn alle. PeakVue ja verhokäyräanalyysi otetaan useasti muiden mittausten tueksi, esimerkiksi laakerivikojen tarkastelua varten. Esimerkiksi voidaan mitata taajuusspektri 10-1800 Hz ja lisäksi PeakVue tai verhokäyrä, joilla saadaan tietoa myös korkeammilta taajuuksilta. Kuvassa 7. on esitetty verhokäyräanalyysin toimintaperiaate. (ABB 2000)



**Kuva 7.** Verhokäyrän toimintaperiaate. (ABB 2000)

Verhokäyräanalyysi perustuu signaalin suodatuksen ja demodulointiin. Siinä signaalista saadaan suodatuksen ja demoduloinnin avulla esiin iskumaisia ilmiöitä muun värähtelyn joukosta. PeakVuessa taas aikatason huippujen avulla saadaan muodostettua PeakVue-signaali, josta lasketaan taajuusspektri. PeakVue-menetelmässä värähtelysignaalin huippujen avulla muodostetaan uusi signaali, josta nähdään toistuvia iskumaisia ilmiöitä. (Mikkonen et al. 2009, s. 221: 222)

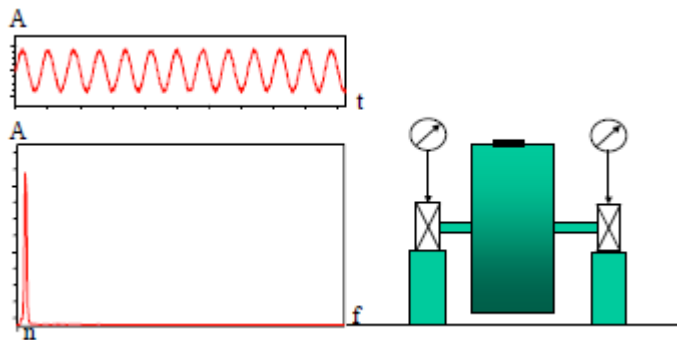
### 3.5 Yleisimmät viat

Värähtely itsessään ei ole vika, vaan oire viasta. Vioilla on tiettyjä niille ominaisia ominaisuuksia taajuusspektrissä. Taajuusspektriä tarkastellaan, jotta pystyttäisiin

tunnistamaan näitä ominaisuuksia ja näin löytämään koneessa olevia vikoja. Jotkin viat kehittyvät hitaasti ja jotkin nopeasti jonka vuoksi muutoksien huomaaminen ajoissa on ensiarvoisen tärkeää. Tässä kappaleessa käsitellään yleisimpiä vikoja pintapuolisesti. Kappaleessa esitetyt taajuusspektrit ovat suuntaa-antavia. Kappaleessa käytettävä termi taajuuskomponentin monikerta tarkoittaa jonkin värähtelykomponentin kerrannaista, joka on sidoksissa sen alkuperäiseen aiheuttajaan, esimerkiksi pyörimisnopeuteen. Sivunauhat taas tarkoittavat tarkasteltavan taajuuden molemmiin puolin olevia piikkejä (PSK 5701). Esimerkiksi laakerivikojen ja vaihteistovikojen spektreissä on havaittavissa näitä.

### 3.5.1 Epätasapaino

Epätasapaino on tavallisin pyörivän koneen vika. Värähtelymittauksissa epätasapainoa ilmenee lähes poikkeuksetta. Epätasapaino johtuu siitä, että pyörivän massan painopiste ei ole täysin keskellä pyörähdysakselia. Epätasapaino esiintyy piikkinä taajuusspektrissä tarkalleen pyörimistaajuudella. Alla olevassa kuvassa 8 on esitetty periaate epätasapainon näkymisestä värähtelymittauksissa. (PSK 5707 & Mikkonen et al. 2009, s. 297: 300)



**Kuva 8.** Epätasapainon näkyminen värähtelymittauksissa. (PSK 5707)

Kasvanut värähtely pyörimistaajuudella voi olla merkki kasvaneesta epätasapainosta. Kasvanut epätasapaino voi johtua esimerkiksi muutoksesta rakenteessa tai liasta pyörivässä osassa. Pyörivässä osassa täytyy tapahtua jokin muutos, jotta epätasapaino voi kasvaa. Epätasapainoa korjataan tasapainottamalla, mikä tarkoittaa käytännössä sitä, että pyöriviin osiin lisätään tai niistä poistetaan massaa. Tämän avulla painopiste yritetään saada mahdollisimman lähelle akselin keskustaa. Tasapainotukselle on annettu tietyt tasapainotusluokat, joihin kone pitäisi saada tasapainotettua. Tasapainotusluokat on määritelty koneen tehon ja käyttötarkoituksen perusteella. Tasapainotus tehdään

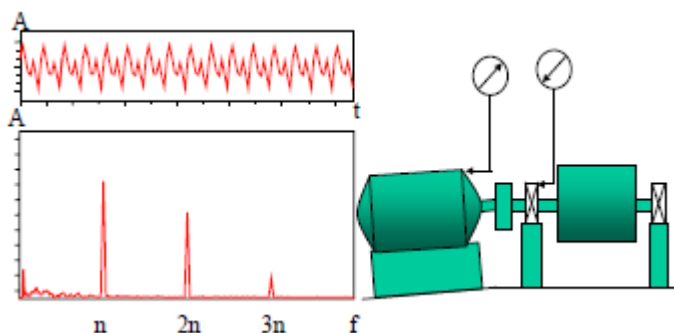
mittaamalla pyörimistaajuisen värähtelyn voimakkuutta ja sen vaihetta. Tasapainotuksen voi tehdä täysin mittalaitteen avulla.

Epätasapainoa voidaan myös käyttää hyväksi esimerkiksi silloin, kun tiedetään varmasti, että taajuusspektristä pyörimistaajuudella erottuva piikki johtuu epätasapainosta. Tällöin laitteen pyörimistaajuus voidaan määrittää epätasapainon piikin avulla, sillä useasti ehjässä koneessa pyörimistaajuus on ainoa tai ainoita muista erottuvia piikkejä. Epätasapainoa lisäämällä voidaan koneesta aiheutuvaa tärinää käyttää hyväksi, esimerkiksi rakentaa yksinkertainen tärstin.

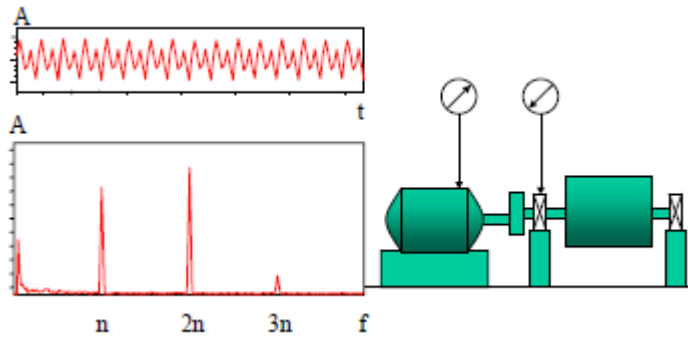
### 3.5.2 Linjausvirhe

Moottori ei aina ole koneen kiinteä osa, vaan joskus moottorin tuottama pyörivä liike eli voima täytyy kytkeä koneen toiminnalliseen osaan, esimerkiksi pumpun akseliin. Linjausvirhettä syntyy, jos moottorin ja pumpun akselit eivät ole yhdensuuntaisia. Linjaus on rutiininomainen toimenpide, joka voidaan tehdä tarvittaessa uudestaan. Akselit kiinnitetään toisiinsa kytkimen avulla. (PSK 5707)

Linjausvirheitä on useita erilaisia, kuten kulmalinjausvirhe ja säteislinjausvirhe. Linjausvirheelle on ominaista, että värähtelyspektriin ilmestyy pyörimistaajuuden toinen monikerta. Joskus on myös nähtävissä piikki pyörimisnopeuden kolmannella monikerralla. Kuvissa 9 ja 10 on esitetty periaate kulmalinjausvirheen ja säteislinjausvirheen näkymisestä värähtelymittauksissa. (PSK 5707)



**Kuva 9.** Kulmalinjausvirhe. (PSK 5707)



**Kuva 10.** Säteislinjausvirhe. (PSK 5707)

### 3.5.3 Resonanssi

Jokaisella rakenteella on ominaistajuuksia. Jos rakenne saa herätteen ominaistajuudellaan, se alkaa resonoida. Resonointi tarkoittaa sitä, että rakenne vahvistaa koneelle ominaista värähtelyä. (PSK 5707)

Resonointi voidaan poistaa muuttamalla koneen toiminnallisia taajuuksia. Käytännössä voidaan esimerkiksi muuttaa koneen pyörimisnopeutta niin, ettei se enää herätä rakenteen ominaistajuuksia. Tämä onnistuu taajuusmuuttajalla, jolla voidaan muuttaa moottorille tulevan virran taajuutta ja näin pyörimisnopeus muuttuu. Tämä ei ole kuitenkaan aina mahdollista. Esimerkiksi, jos järjestelmä vaatii tietyn moottorin pyörimistä juuri tietyllä nopeudella oikean virtauksen saamiseksi. Taajuusmuuttajia ei välttämättä pystytä käyttämään joka paikassa. Ydinvoimaloissa niitä ei voida käyttää kriittisimmissä paikoissa turvallisuussyistä. Tällöin koneeseen voidaan tehdä rakenteellisia muutoksia joko ominaistajuuksiin tai herätteisiin. Jos pumppuun vaihdetaan juoksupyörän lapojen määrä, niin pumpun lapataajuus muuttuu. Tällöin myös lapataajuuden aiheuttama heräte muuttuu. On myös mahdollista muuttaa rakenteen ominaistajuutta. Tukemalla rakennetta eli tekemällä siitä jäykempi ominaistajuus nousee, kun taas heikentämällä rakennetta koneen rakenne muuttuu kimmoisammaksi ja ominaistajuus laskee. Taajuusspektrissä resonanssi näkyy yleensä yhtenä piikkinä rakenteen jonkin ominaistajuuden kohdalla. (Mikkonen et al. 2009, s. 302)

### 3.5.4 Laakereiden viat

Laakerit mahdollistavat koneen pyörivän liikkeen. Tavallisimmassa tilanteessa laakeri on kiinni koneen rungossa ja laakerin keskellä on pyörivä akseli. Akselin värähtely

välitty koneen runkoon laakerin kautta. Laakeri on siis ainoa osa pyörivän akselin ja rungon välissä. Yleisimmin jokaisessa laitteessa, esimerkiksi moottorissa tai pumpussa on vähintään kaksi laakeria. Yleisin laakeri on vierintälaakeri. Vierintälaakeri koostuu ulkokehästä, rullista tai kuulista, niiden pidikkeestä ja sisäkehästä.

Laakerille pystytään laskemaan kestoikä, mutta käytännössä laakerit eivät koskaan pääse suunniteltuun kestoikään asti, vaan kestävät noin 10% siitä (Mikkonen et al. 2009, s. 311). Laakereiden vikaantumiselle on tyypillistä, että viat kehittyvät vähitellen. Vikaantumisen edetessä värähtelyspektristä pystytään havaitsemaan yhä enemmän erilaisia laakerivikaan liittyviä piirteitä, joiden perusteella myös laakerien jäljellä olevaa kestoikää pystytään arvioimaan (PSK 5707). Tämän vuoksi laakerit ovatkin yksi tärkeimmistä kunnonvalvonnan kohteena olevista koneen osista. Hajotessaan laakeri voi myös aiheuttaa koneeseen muita vaurioita.

Laakerin jokainen osa voi vikaantua. Jokaisella laakerin osalla on myös ominainen vikataajuutensa, jotka voidaan laskea ja näin ne pystytään tunnistamaan värähtelyspektristä. Laakerin vikataajuudet eli laakerin komponenttien ohitustaajuudet lasketaan kaavoilla 3-6. Ulkokehän ohitustaajuus (BPFO, Ball Pass Frequency of Outer ring) saadaan kaavasta (3), sisäkehän ohitustaajuus (BPFI, Ball Pass Frequency of Inner ring) saadaan kaavasta (4), vierintäelinten ohitustaajuus (BSF, Ball Spin Frequency) saadaan kaavasta (5) ja pidikkeen ohitustaajuus (FTF, Fundamental Train Frequency) saadaan kaavasta (6). (Mikkonen et al. 2009, s. 311: 316)

$$f_u = BPFO = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos\beta\right) \cdot n \quad (3)$$

$$f_s = BPFI = \frac{N}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos\beta\right) \cdot n \quad (4)$$

$$f_v = BSF = \frac{D}{2d} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos\beta\right)^2\right] \cdot n \quad (5)$$

$$f_p = FTF = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos\beta\right) \cdot n \quad (6)$$

missä N on laakerin vierintäelinten lukumäärä [kpl],

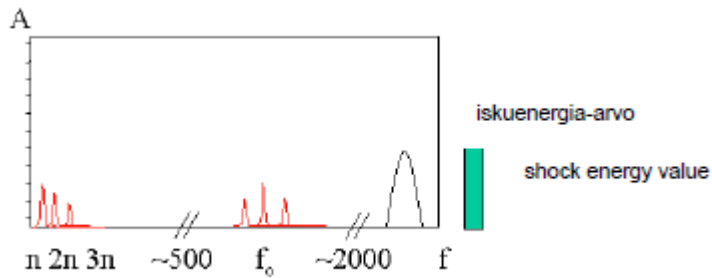
d on laakerin vierintäelinten halkaisija [mm],

D on laakeri vierintäelinten välinen halkaisija [mm],

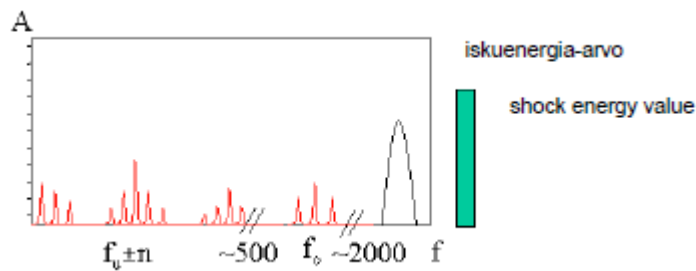
$\beta$  on kosketuskulma [astetta],

$n$  on sisä- ja ulkokehän suhteellinen pyörimisnopeus [1/s].

Oikein toimiessaan laakeri aiheuttaa ainoastaan pientä värähtelyä. Kuvissa 11 ja 12 on esimerkki yksittäisen laakerivian värähtelyspektristä ja pitkälle edenneen laakerivian spektristä.



**Kuva 11.** Yksittäisen laakerivian spektri. (PSK 5707)



**Kuva 12.** Kehittyneen laakerivian spektri. (PSK 5707)

Kehittyneen laakerivian taajuuskomponenteissa on nähtävissä ulkokehän ohitustaajuus, sekä sen sivunauhoja. Laakerivioille on myös ominaista yli 2000 Hz taajuuksilla esiintyvä Haystack-ilmiö, joka näkyy kuvissa 11 ja 12 (Mikkonen et al. 2009, s. 253).

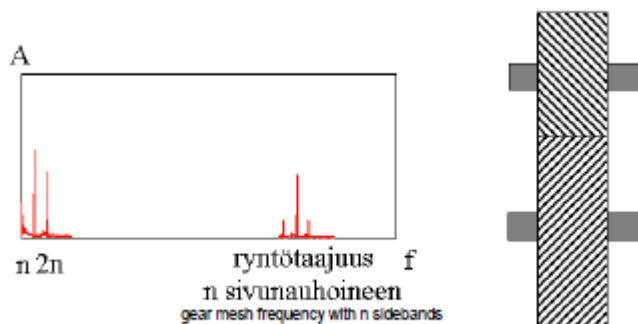
### 3.5.5 Vaihteistojen viat

Vaihteisto muuttaa moottorin pyörimisnopeuden halutuksi. Yleensä vaihteisto sijaitsee moottorin ja toimilaitteen välissä. Vaihteiston jokaisella hammaspyörällä on myös akseli ja laakerit. Vaihteistossa esiintyvät viat ovat yleensä hammasvikoja tai laakerivikoja. (Mikkonen et al. 2009, s. 321: 324)

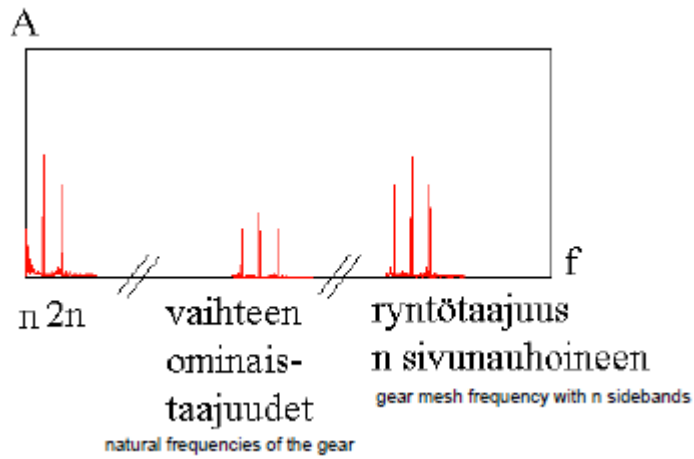


Vaihteistolle on ominaista, että spektrissä näkyy hampaiden ryntötaajuus eli hammaskosketuksen aiheuttama taajuus. Ryntötaajuus lasketaan kertomalla hammasluku tämän hammaspyörän pyörimisnopeudella. (Björk et al. 2014, s. 329: 330)

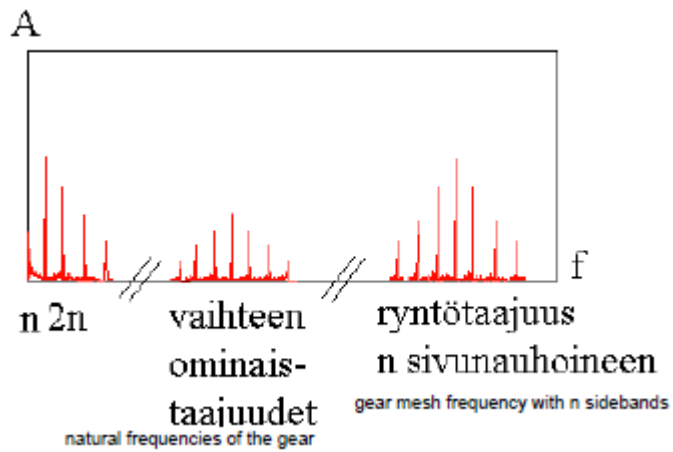
Kuvassa 13 on esimerkki normaalikuntoisen hammasvaihteen värähtelyspektristä. Normaali kuntoisen hammasvaihteen värähtelyspektristä on nähtävissä piikit pyörimistaajuudella, sen toisella monikerralla, sekä ryntötaajuudella. Nähtävissä myös ryntötaajuuden sivunauhat. Kuvassa 14 on esimerkki hammasvaihteen värähtelyspektristä, johon on ilmestynyt ensimmäiset merkit vikaantumisesta. Värähtelyspektristä on nyt nähtävissä kasvua ryntötaajuuden sivunauhoissa, sekä vaihteen ominaistuuksien ilmestyminen spektriin. Kuvassa 15 on esimerkki hampaiden epäkeskeisyydestä, virheellisestä hammasvälyksestä tai akselien yhdensuuntausvirheestä. Tässä tapauksessa pyörimistaajuuden monikerrat ovat lisääntyneet ja sivunauhojen määrä ryntötaajuudella ja vaihteiston ominaistuuksilla on kasvanut. Kuvassa 16 on esimerkki viallisesta hampaasta. Viallisen hampaan tunnistaa helppoiten iskuista aikatasossa. Kuvassa 17 on esimerkki viallisesta hammasparista. Viallisen hammasparin tunnistaa iskusta, joka syntyy, kun vialliset hampaat osuvat yhteen. Tämä taajuus on useasti hyvin matala, eikä näy välttämättä mittauksissa. (PSK 5707)



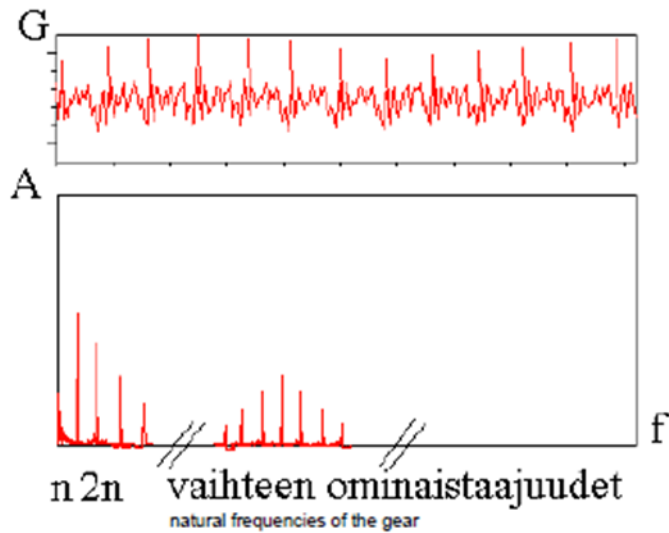
**Kuva 13.** Normaalin hammasvaihteen spektri, jossa näkyy ryntötaajuus sivunauhoineen sekä pyörimisnopeus ja sen toinen monikerta. (PSK 5707)



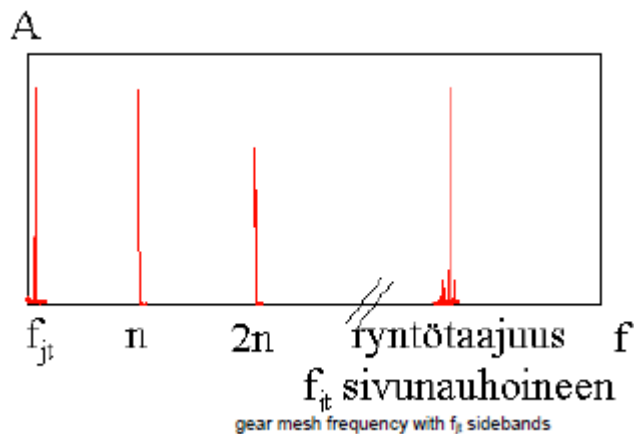
**Kuva 14.** Hampaiden kulumisessa vaihteen ominaistaajuudet ilmestyvät spektriin. (PSK 5707)



**Kuva 15.** Hampaiden epäkeskeisyys, virheellinen hammasvällys ja akselien yhdensuuntausvirhe. Näissä vioissa ilmestyy huomattava määrä sivunauhoja. (PSK 5707)



**Kuva 16.** Viallisen hampaan tunnistaa helpoiten aikatasossa näkyvistä iskuista. (PSK 5707)



**Kuva 17.** Viallinen hammaspari. (PSK 5707)

### 3.5.6 Sähkömoottoreiden viat

Sähkömoottori on tavanomainen mekaanisen voiman lähde. Tässä kappaleessa puhutaan sähkömoottoreista, jotka toimivat voimavirralla eli 3-vaiheisella vaihtovirralla. Kolmivaihevirta tarkoittaa virtaa, joka tulee käytännössä kolmea kaapelia pitkin. Jokaista kaapelia pitkin tuleva virta on eri vaiheessa ja tämä mahdollistaa jatkuvan pyörivän liikkeen moottorille.

Sähkömoottorissa on akseli, joka pyörii sähköä aiheuttaman magneettikentän avulla. Sähkömoottorissa on myös kaksi laakeria, jotka mahdollistavat akselin pyörimisen, sekä roottorisauvat, joilla magneettikenttä luodaan. Sähkömoottorissa on tavallisesti myös puhallin, joka hoitaa jäähdytyksen. Sähkömoottorissa voi siis olla laakerivikoja,

laakereiden linjauksiin liittyviä vikoja, sekä epätasapainoa. Sähkömoottorilla on kuitenkin myös muita ominaisia vikoja, joita ei esiinny muissa komponenteissa. Sähkömoottorille jonka virta ei tule taajuusmuuttajan kautta on ominaista 100 Hz tai 120 Hz piikki värähtelyspektrissä, joka johtuu vaihtovirran taajuudesta, joka on Suomessa yleensä 50 Hz. 100 Hz on siis tämän toinen monikerta, joka johtuu siitä, että vaihtovirta vaihtaa suuntaa. Tälle värähtelyn taajuuskomponentille on ominaista, että värähtelyn taajuus on tasan 100 Hz. Tämän taajuuskomponentin kasvu johtuu vaihtovirtamoottorin sähköisestä epätasapainosta, jota löytyy aina. 100 Hz taajuuskomponentin nopea kasvu on varma merkki vaihtovirtamoottorin vikaantumisesta. Voimavirran aiheuttaman piikin voi sekoittaa esimerkiksi pyörimistaajuuden toiseen monikertaan, mikäli pyörimistaajuus on 50 Hz. Pyörimistaajuuden toinen monikerta on kuitenkin harvoin tasan 100 Hz, vaan yleensä se on yhden tai pari Hertsiä pienempi. Voimavirran aiheuttama toinen monikerta on riippuvainen moottorille tulevan sähköön taajuudesta. Jos käytössä on taajuusmuuttaja, on spektrissä näkyvä taajuus taajuusmuuttajan moottorille syöttämän taajuuden toinen monikerta. Taajuusmuuttajan syöttäessä moottorille esimerkiksi 30 Hz taajuista virtaa, on spektrissä näkyvä komponentti tällöin 60 Hz. Sähkömoottorin toinen mahdollinen vika on roottorisauvan hajoaminen. Roottorisauvoja sähkömoottorissa voi olla esimerkiksi 87 kappaletta ja yhden sauvan hajoaminen voi näkyä kasvuna moottorin tahtinopeuden 87-monikerralla. (Mikkonen et al. 2009, s. 326: 343)

## 4 YHTEENVETO

Kaikki pyörivät koneet värähtelevät toimiessaan. Värähtelyn voidaan ajatella olevan jousi-massa-systeemin liikettä tasapainoasemansa suhteen. Värähtelystä muodostetaan mittauksien avulla värähtelysignaali, jota voidaan tarkastella aikatasossa ja tai siitä laskettuna taajuusspektrinä. Näistä pystytään laskemaan erilaisia tunnuslukuja, joita voidaan seurata. Tarvittaessa värähtelyä voidaan tulkita taajuuskohtaisesti ja löytää vikoja. Löydetty viat tulisi hoitaa kuntoon ennen kuin kone pääsee hajoamaan.

Jotta värähtelymittauksilla päästäisiin parhaisiin mahdollisiin tuloksiin, täytyy ne tehdä luotettavasti. Tämä onnistuu tuntemalla menetelmät ja toimimalla niiden mukaan. Käytettävät välineet ja menetelmät täytyy osata valita oikein jokaiselle mitattavalle koneelle. Väärällä menetelmällä voidaan saada täysin kelvottomia tuloksia ja pienikin virhe voi tehdä mittauksesta hyödyttömän. Tämän vuoksi kaikkien värähtelymittauksia tekevien, suunnittelevien ja analysoivien henkilöiden täytyy tietää, mitä he tekevät.

Useilla koneilla on tyypilliset vikaantumismekanismit ja useilla vioilla on tyypilliset kehittymismekanismit. Nämä tuntemalla voidaan koneen kuntoa tulkita luotettavasti. Myös vikojen kehittymistä pystytään seuraamaan ja näin optimoimaan koneiden huollot. Huolletut laitteet toimivat paremmin, pidempään ja ovat turvallisempia. Tästä syystä kunnonvalvonta kannattaa.

## 5 LÄHDELUETTELO

ABB, 2000. ABB:n TTT -käsikirja 2000-07. Kunnonvalvonta ja huolto

[verkkodokumentti]. Saatavissa:

[http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/23\\_Kunnonvalvonta%20ja%20huolto.pdf](http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/23_Kunnonvalvonta%20ja%20huolto.pdf)

[20.11.2017]

Björk, T., Hautala, P., Huhtala, K., Kivioja, S., Kleimola, M., Lavi, M., Martikka, H., Miettinen, J., Ranta, A., Rinkinen, J., & Salonen, P., 2014. Koneenosien suunnittelu. 6 painos. Helsinki: Sanoma Pro OY, 517 s. ISBN 978-952-63-0798-5

Emerson. Kannettava värähtelymittalaite.

<http://www2.emersonprocess.com/SiteCollectionImages/News%20Images/Emerson%207s%20CSI%202140.jpg> [20.11.2017]

Goldman S., 1999. Vibration Spectrum Analysis. 2 painos. New York: Industrial Press Inc, 331 s. ISBN 0-8311-3088-1

ISO 10816-3, 2012. Mechanical Vibration. Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts. Part 3: Industrial Machines with Nominal Power Above 15 KW and Nominal Speeds Between 120 R/MIN and 15 000 R/MIN When Measured in Situ. Suomen standardoimisliitto SFS: 12+ 2 s.

Karioja K., 2017. konediagnostiikan mittausjärjestelmät -kurssin luentomoniste, Oulun yliopisto.

Laukkanen J., 2017. Värähtelymekaniikka -kurssin kaavakokoelma, Oulun Yliopisto.

Mikkonen, H. (toim.), Miettinen, J., Leinonen, P., Jantunen, E., Kokko, V. & Riutta, E., 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito. Käsikirja. Helsinki: KP-Media OY, 606 s. ISBN 978-952-99458-4-9

PSK 5701, 2015. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Käsitteet ja määritelmät.

Käytettävät suureet ja mittayksiköt. 7 painos. PSK Standardisointiyhdistys ry: 15 s.

PSK 5702, 2007. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Mittauspisteen valinta ja tunnistaminen. 3 painos. PSK Standardisointiyhdistys ry: 4 s.

PSK 5703, 2006. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Anturin, liittimen ja kaapelin valinta sekä asennus. 4 painos. PSK Standardisointiyhdistys ry: 10+ 1 s.

PSK 5707, 2011. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Vianmääritys. 5 painos. PSK Standardisointiyhdistys ry: 34 s.

PSK 5710, 2010. Kunnonvalvonnan värähtelymittaus. Mittalaitteiden tyypit ja valinta. 3 painos. PSK Standardisointiyhdistys ry: 7 s.

PSK 5715, 1999. Kunnonvalvonta, värähtelymittaus. Mittausjärjestelmän toiminnallinen tarkistus. 1 painos. PSK Standardisointiyhdistys ry: 6 s.